

КОАКСИАЛЬНАЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКАЯ ЛИНЗА

© Л.П.Овсянникова, Т.Я.Фишкова

Коаксиальные электростатические линзы находят применение в плазмооптических и транспортирующих системах, в манометрических приборах и т. п. Их достоинством является большая оптическая сила и простота конструкции. Фокусирующие свойства этих линз исследовались в целом ряде работ (см., например, [1-3]). Однако до настоящего времени не проведено их полного исследования. Так, не были найдены режимы фокусировки "точка в точку", представляющие большой практический интерес.

Данная работа посвящена коаксиальным цилиндрическим линзам (КЦЛ) с торцевыми диафрагмами (рис. 1). Нами было показано ранее, что в приторцевой области заряженные частицы двигаются равнозамедленно. Поэтому поле линзы можно аппроксимировать эффективным прямоугольником, длина которого меньше длины самой линзы. При этом на входе и выходе из эффективного поля меняется только энергия частиц, а направление движения остается неизменным. Распределение потенциала КЦЛ можно представить в следующем виде:

$$\Phi = 2(V/\pi)\sqrt{R_2/r_a}\left\{A_1 + A_2\pi(r - r_a)/l + \right. \\ \left. + 1/2A_3(\pi/l)^2[(r - r_a)^2 - z^2]\right\}, \quad (1)$$

где

$$A_1 = \text{arctg} \left\{ \text{sh}^{-1} [\pi(R_2 - r_a)/l] \right\} - P \text{sh} [\pi(R_2 - r_a)/l],$$

$$A_2 = \text{ch}^{-1} [\pi(R_2 - r_a)/l] + P \text{sh} [\pi(R_2 - r_a)/l] - A_1 l / (2\pi r_a),$$

$$A_3 = \{ \text{ch}^{-2} [\pi(R_2 - r_a)/l] - P \} \text{sh} [\pi(R_2 - r_a)/l],$$

$$P = 4 \{ \exp[2\pi(R_2 - R_1)/l] - 1 \}, \quad r_a = r_0 + r'_0(1 - k)l/2.$$

Здесь R_1 и R_2 — радиусы внутреннего и внешнего цилиндрических электродов, l — расстояние между торцевыми электродами, kl — эффективная длина линзы. Через r_0 и r'_0 обозначены значения координат и тангенсов углов наклона траекторий в плоскости входной диафрагмы. Торцевые электроды и внутренний цилиндрический электрод заземлены, потенциал внешнего цилиндра равен "V".

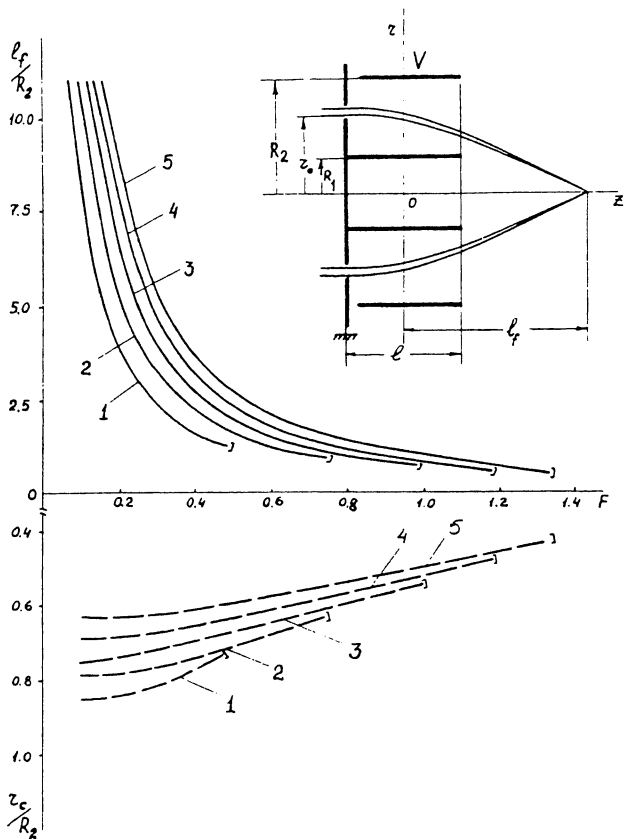


Рис. 1. Расстояния от средней плоскости до точки пересечения оси для КЦЛ с параллельным пучком на входе (сплошные кривые) и начальные координаты входа центральной траектории пучка (штриховые кривые) в зависимости от возбуждения КЦЛ длиной $l = R_2$ при изменении r_2/R_1 : 1 — $R_2/R_1 = 2$; 2 — 3; 3 — 5; 4 — 10; 5 — 30.

В таком поле уравнение движения заряженных частиц интегрируется. Тогда для параллельного на входе в линзу пучка траектория и ее угол наклона вне эффективного поля будут определяться следующими выражениями:

$$r = r_a - A_2(\pi A_3)^{-1}(ch\gamma - 1)l + r'(z - kl/2), \quad r' = -A_2\sqrt{N/(\pi A_3)}sh\gamma, \quad (2)$$

где

$$\gamma = 2 \operatorname{arctg}(\sqrt{\pi N A_3 k}/2), \quad N = eV\sqrt{R_2/r_a}/(\varepsilon - e\Phi_a).$$

Здесь N — сила КЦЛ, ε — энергия частиц в свободном от поля пространстве, Φ_a — значение потенциала на входе в

эффективное поле линзы, полученное из (1) при $r = r_2$ и $z = 0.5(k - 1)l$. Протяженность эффективного поля линзы зависит от ее геометрии и определение этой зависимости требует дополнительных расчетов.

Анализ результатов исследования КЦЛ показал, что при отклонении частиц к оси фокусировка "точка в точку" происходит только вокруг определенной траектории со входной координатой $r_0 = r_c$ в диапазоне изменения входных координат Δr_0 , определяемом требуемым размером кроссовера. В качестве примера нами были рассчитаны параметры КЦЛ, у которой $R_2/R_1 = 5$, $l = R_2$, при изменении отношения разности потенциалов между электродами к энергии заряженных частиц. Величину $F = eV/\varepsilon$ в дальнейшем будем называть возбуждением КЦЛ. При $F = 0.5$ и $r_c = 0.55R_2$ параллельный пучок размером $\Delta r_0 = 0.03R_2$ фокусируется в точку на оси линзы на расстоянии $l_f = 2.50R_2$, отсчитываемом от средней плоскости линзы. Отличие результатов расчета траекторий по аналитическим формулам и численных составляло не более 8%.

Расчеты по аналитическим формулам показали, что КЦЛ с торцевыми электродами при определенных начальных условиях может фокусировать пучки заряженных частиц на ось. Однако, в то время как торцевой электрод на входе необходим в качестве вырезающей кольцевой пучок диафрагмы, второй торцевой электрод на выходе также с кольцевой щелью усложняет конструкцию системы.

Нами проведен численный расчет на компьютере КЦЛ с открытым задним торцом, показавший наличие фокусировки пучка на ось, причем качество последней не хуже, чем у КЦЛ с закрытым задним торцом.

На рис. 1 приведена зависимость положения фокуса КЦЛ (сплошные кривые), отсчитываемого от средней плоскости линзы, от ее возбуждения. Длина линзы $l = R_2$, а соотношение радиусов менялось в широком, ^{в широком, ростом} R_2/R_1 , действие КЦЛ на пучок заряженных частиц становится слабее. Следует отметить, что для каждого значения параметра R_2/R_1 существует свое максимальное возбуждение линзы, обеспечивающее минимальное расстояние до точки пересечения оси системы параллельным на входе пучком $(l_f)_{\min}$, отмеченное на рисунке скобочкой. При большем возбуждении такой пучок садится на внутренний цилиндр. Чем больше R_2/R_1 , тем меньше величина $(l_f)_{\min}$ может быть достигнута.

На основании обработки численных расчетов пучка заряженных частиц с различной энергией найдена простая эмпирическая формула для коэффициента хроматической аберрации КЦЛ, длина которой равна радиусу внешнего

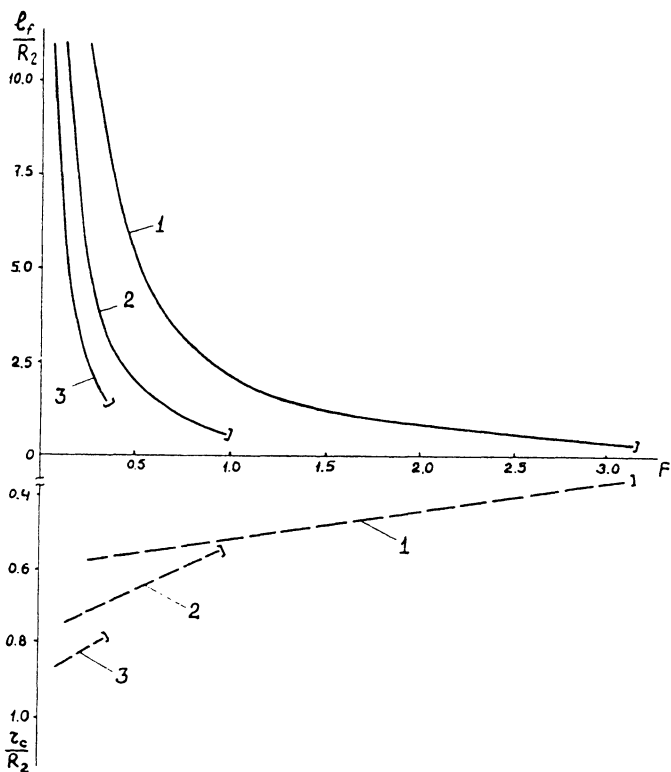


Рис. 2. То же, что на рис. 1 для КЦЛ с $R_2/R_1 = 5$ при изменении ее длины l : 1 — $l/R_2 = 0.5$; 2 — 1.0; 3 — 2.0.

цилиндра:

$$C/R_2 = 0.5[1 + \ln(R_2/R_1)]/F. \quad (3)$$

При $R_2/R_1 \leq 10$ отличие результатов, полученных по этой формуле, от численных расчетов не превышает 15%; при $R_2/R_1 = 30$ это отличие составляет 30%.

Результаты численных расчетов фокусировки параллельного пучка КЦЛ различной длины $0.5 \leq l/R_2 \leq 2.0$ при $R_2/R_1 = 5$ приведены на рис. 2. Сплошные кривые относятся к положению фокуса, штриховые — к координате входа центральной траектории пучка. С ростом длины линзы величина ее возбуждения уменьшается для одних и тех же положений фокусов при одновременном росте входной координаты, что обеспечивает большую светосилу за счет возрастания площади входного кольца. Однако при этом увеличивается минимально достижимое расстояние до точки пересечения

| f/R | КЦЛ $R_2/R_1=2$ F | КЛ F | ОЛ F | ОЛ $-F$ |
|-------|---------------------------|-----------|-----------|------------|
| 2 | 0.34 | 1.0 | — | 0.96 |
| 3 | 0.24 | 0.67 | 9.0 | 0.86 |
| 5 | 0.17 | 0.40 | 2.6 | 0.75 |
| 10 | 0.09 | 0.20 | 1.4 | 0.60 |

пучком оси $(l_f)_{\min}$. Во всех приведенных выше режимах работы КЦЛ качество фокусировки параллельного на входе пучка определялось размером кроссовера на оси в радиальном направлении (r_f), который составлял $r_f \leq 10^{-3} R_2$ при ширине входного кольца $\Delta r_0 = 0.03 R_2$.

Представляет интерес сравнить КЦЛ с широко распространенными электростатическими осесимметричной (ОЛ) и квадрупольной (КЛ) линзами. Из большого количества ОЛ выбрана наиболее часто используемая одиночная линза из трех последовательно расположенных цилиндров одинакового диаметра. В таблице приведены возбуждения этих линз, обеспечивающие равные фокусные расстояния, отсчитываемые от средней плоскости (у КЦЛ это параметр l_f), для линз с одинаковыми радиусами апертур R (для КЦЛ $R = R_2$) и одинаковыми длинами $l = R$ (для ОЛ l — длина среднего электрода с потенциалом $\pm V$, крайние электроды заземлены).

Из таблицы видно, что коаксиальная линза сильнее действует на пучки заряженных частиц, чем осесимметричная и квадрупольная линзы. Кроме того, при одинаковых размерах кроссовера в фокальной плоскости $r_f = (1 \div 3) 10^{-3} R$ светосила КЦЛ превышает светосилу квадрупольной линзы в 2 раза, а осесимметричной в 1.5 раза при условии равномерного распределения по углу начальной интенсивности пучка.

Следует отметить, что у коаксиальной линзы перед квадрупольной имеются два еще более существенных преимущества: простота конструкции и наличие режима фокусировки “точка в точку”, в то время как КЛ фокусирует точку в линию.

В дальнейшем будут рассчитаны нагрузочные характеристики КЦЛ в широком диапазоне изменения геометрических параметров, а также исследованы транспортирующие системы из них.

Список литературы

- [1] *Овсянникова Л.П., Пасовец С.В.* // ЖТФ. 1987. Т. 57. В. 12. С. 2351-2354.
- [2] *Krejcik P., King B.V., Kelly I.C.* // *Optic.* 1980. V. 55. P. 385-393.
- [3] *Ovsyannikova L.P., Pasovets S.V., Shpak E.V.* // *Nucl. Instr. Meth. A298.* 1990. P. 344-348.

Физико-технический институт
им. А.Ф. Иоффе РАН
С.-Петербург

Поступило в Редакцию
18 июня 1996 г.
